

船舶电缆老化预测研究

吕志立¹, 王荣杰², 蒋德松²

(1. 厦门三安集成电路有限公司, 福建 厦门 361021; 2. 集美大学轮机工程学院, 福建 厦门 361021)

[摘要] 为了预测船舶电缆的老化状况, 首先对船舶电缆进行建模, 分析船舶电缆的老化过程, 得出阻抗和电弧电流的变化规律, 然后利用卡尔曼滤波算法对电缆老化过程中的阻抗值进行预测, 依据预测的阻抗值和当前阻抗值的残差来检测电缆工作状态; 通过检测电弧电流的变化, 预测船舶电缆老化产生前期故障的临界状态。仿真实验表明该预测方法具有可行性。

[关键词] 船舶电缆; 老化; 卡尔曼滤波; 阻抗; 电弧电流

[中图分类号] U 665.1

Study on Aging Prediction of Ship Cable

LYU Zhili¹, WANG Rongjie², JIANG Desong²

(1. Xiamen Sanan Integrated Circuit Co., Ltd, Xiamen 361021, China;

2. School of Marine Engineering, Jimei University, Xiamen 361021, China)

Abstract: In order to predict the aging of the ship cable, the ship cable was modeled and the aging process of the ship's cable is analyzed. The variation law of the impedance and the arc current was obtained. Then the Kalman filter algorithm is used to predict the impedance value of the cable aging process. The impedance state is predicted by the residual value of the impedance value and the current state impedance value of the current state, and the critical state of the pre-failure is generated by the residual detection cable fault. Through detecting the change of the arc current, critical state of aging ship cable incipient faults were identified. Simulation results show that the proposed method is feasible.

Keywords: ship cable; aging; kalman filter; impedance; arc current

0 引言

船舶电缆承担整艘船舶电能的传输, 是船舶组成中非常重要的角色。海上湿度较大, 盐度较高, 机舱油雾浓度高, 并且电缆线芯在电能和电信号的传输过程中会产生相当大的热量, 以及电缆受到不同程度的振动和冲击等, 在众多因素的综合作用下电缆绝缘层材料很容易受到损坏, 导致绝缘性能下降甚至失效, 进而影响船上电气系统的安全和稳定, 轻则船舶无法正常运行, 重则船毁人亡。船舶电缆与陆上电缆有显著不同, 陆上电缆是通过高架线路进行铺设的, 而船舶电缆通过电缆托架进行铺设, 电缆与电缆托架之间会构成电容器, 在海洋环境下, 电缆绝缘层易被腐蚀老化, 同时伴有短路电

[收稿日期] 2017-07-03

[修回日期] 2017-12-28

[基金项目] 国家自然科学基金项目 (51309116); 福建省自然科学基金项目 (2016J01736, 2015J01641); 福建省高等学校新世纪优秀人才支持计划项目 (B17159); 农业部渔业装备与工程技术重点实验室基金项目 (2016002); 四川省重点实验室基金项目 (2017RJY02); 集美大学科研项目 (ZC2014003)

[作者简介] 吕志立 (1994—), 男, 硕士, 从事电力系统故障诊断研究。通信作者: 蒋德松 (1975—), 男, 副教授, 博士, 从事动力装置自动研究。

弧。目前, 关于电缆故障诊断的研究主要针对寿命预测^[1-3]和故障位置定位^[4-10], 然而针对电缆老化预测方面的研究较少^[11]。因此, 本文提出一种基于卡尔曼滤波器的船舶电缆老化预测方法。

1 船舶电缆老化过程中阻抗和电弧电流有效值变化规律

1.1 船舶电缆老化过程

船舶电缆是均匀传输线路, 船舶电缆模型如图1所示。其中: 电感 L_2 表示每单位长度电缆具有的电感; R 表示每单位长度电缆具有的电阻; C_2 表示每单位长度电缆具有的电容; C_1 表示由于电缆老化使电缆与电缆托架之间构成电容器的电容; arc 为电缆老化过程中产生的短路电弧; AC 是交流电源; L_1 集中反映交流电流在通过除老化电缆之外的其余电缆线时产生的磁场效应^[12]。

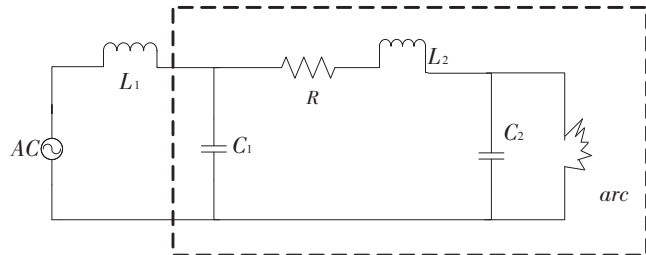


图1 船舶电缆模型

Fig. 1 The Model of Ship Cable

电缆老化表现为: 绝缘层逐渐被腐蚀, 绝缘性越来越差, C_1 的电介质相对介电常数 ϵ_r 变小, 根据 $C = \epsilon_r S / (4\pi k d)$ (其中: C 表示电容量; ϵ_r 表示相对介电常数; S 表示电容器两极板正对面积; d 表示两极板的距离; k 表示静电常数; π 表示圆周率。)可知, C_1 的电容值也会逐渐变小; 当电缆的绝缘层被腐蚀处于临界状态时, C_2 两端将会产生短路电弧, 并且随着绝缘性越来越差, 短路电弧的电导率 G_{s0} 将逐渐增大。

1.2 阻抗和电弧电流有效值变化规律

图1中电缆模型的阻抗公式为:

$$Z = (R + j\omega L_2 + Z_x)(-j(1/(\omega C_1)))/(R + j\omega L_2 + Z_x - j(1/(\omega C_1)))。$$

式中: Z 表示船舶电缆的阻抗, C_2 和短路电弧并联的阻抗 $Z_x = Z_{arc}(-j(1/(\omega C_2)))/(Z_{arc} - j(1/(\omega C_2)))$, Z_{arc} 表示短路电弧的阻抗; ω 为角频率。

船舶电缆与船舶机舱及机舱的其他电气设备是相互绝缘的, 在电缆老化过程中会出现短路电弧, 电弧是一种气体导电现象, 由于电弧的产生使船舶电缆与船舶机舱及机舱的其他电气设备通过电弧构成回路, 产生电弧电流, 即短路电流, 导致电力系统局部短路, 随着电缆老化越来越严重, 电弧电导率逐渐变大, 产生的电弧电流也会越来越大。电弧电流越大, 电力系统局部短路的短路电流也会越大, 船舶电力系统的安全性和稳定性也就越差, 因此可以用电弧电流的变化反应船舶电力系统的安全性和稳定性。

本文研究阻抗和电弧电流变化规律的思路: 通过减小模型中电缆与电缆托架构成的电容器的值, 增大短路电弧电导的值, 模拟电缆的老化过程。老化过程中测量电缆的阻抗和电弧电流, 并将电弧电流通过均方根模块处理, 均方根模块可以确定交流脉动电流的有效值, 这样可以定量分析交流脉动电流的变化, 使变化规律更加精确。均方根可以由 $x_{rms} = \sqrt{(x_1^2 + x_2^2 + \dots + x_n^2)/N}$ 计算。

1.3 阻抗和电弧电流有效值数据采集

在仿真实验中首先搭建船舶电缆模型, 通过减小模型中电缆与电缆托架构成的电容器的值, 增大短路电弧电导的值, 模拟电缆的老化过程, 采集电缆老化过程中阻抗值和电弧电流有效值, 并且观察它们的变化规律。

在电缆老化过程中, 电容 C_1 逐渐减小, 仿真实验中 C_1 的变化范围是 $5 \times 10^{-3} \sim 2 \times 10^{-5} \text{ F}$ ^[12], 阻抗的变化规律如图2所示。由图2可知, 在电缆老化过程处于临界时阻抗会发生突变。

在电缆阻抗突变之前, 电弧的电导率 G_{s0} 几乎不变, 仿真实验中 $G_{s0} = 0.2 \text{ S}$ 。当电缆阻抗突变之后, 电弧的电导率按线性关系增加, 仿真实验中电容 C_1 每增加 0.0001 F , 相应地电导也增加 15 S 。电弧电流有效值随电容变化的关系如图3所示。由仿真结果可以表明, 电缆在老化过程中会产生短路

电弧,同时电弧电流有效值会突变,并且之后一直会保持很大的值。

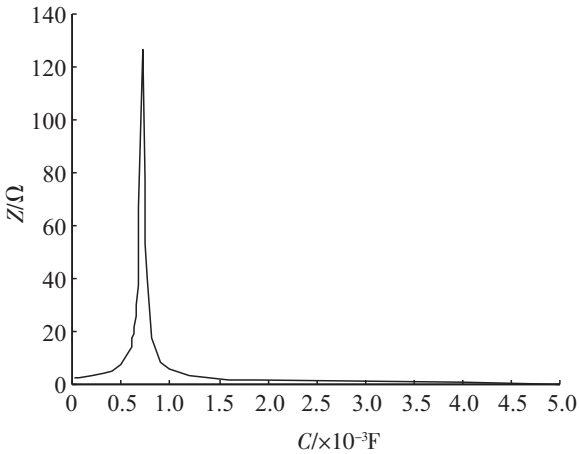


图 2 阻抗随电容变化曲线

Fig.2 The change curve of impedance with capacitor

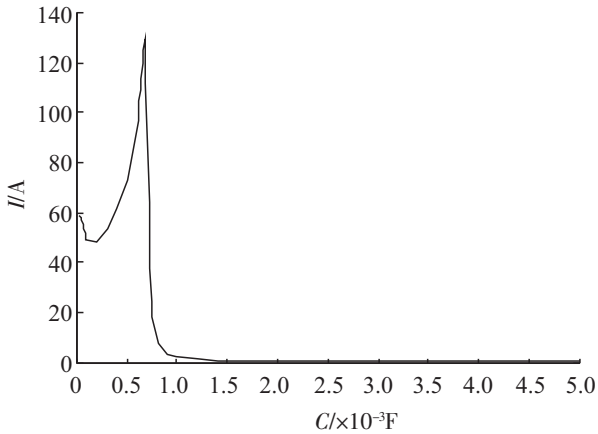


图 3 电弧电流有效值随电容变化曲线

Fig.3 The change curve of the effective value of arc current with capacitor

2 基于卡尔曼滤波算法的船舶电缆老化预测方法

2.1 船舶电缆老化预测原理

本文所提出的预测方法是利用卡尔曼滤波算法对电缆老化过程中的阻抗值进行预测,用预测到下一个状态的阻抗值和当前状态阻抗值的残差 W_n 来表示阻抗的突变,通过残差检测电缆老化产生前期故障的临界状态。

残差 W_n 的表达式为: $W_n = \hat{x}(n+1) - Z_n$ 。式中: Z_n 表示 n 时刻的阻抗值; $\hat{x}(n+1)$ 表示 $n+1$ 时刻由卡尔曼滤波算法预测的阻抗值。

阻抗残差的临界值为 H_{1n} , 如果 $W_n > H_{1n}$, 表明电缆老化产生了前期故障。

电弧电流有效值 I_n 的临界状态为 H_{2n} , 如果电弧电流有效值 $I_n > H_{2n}$, 表明电缆的老化使船舶电力系统的安全性和稳定性受到威胁,需要及时更换电缆。

基于此原理,本文提出的船舶电缆老化预测方法流程图如图 4 所示。

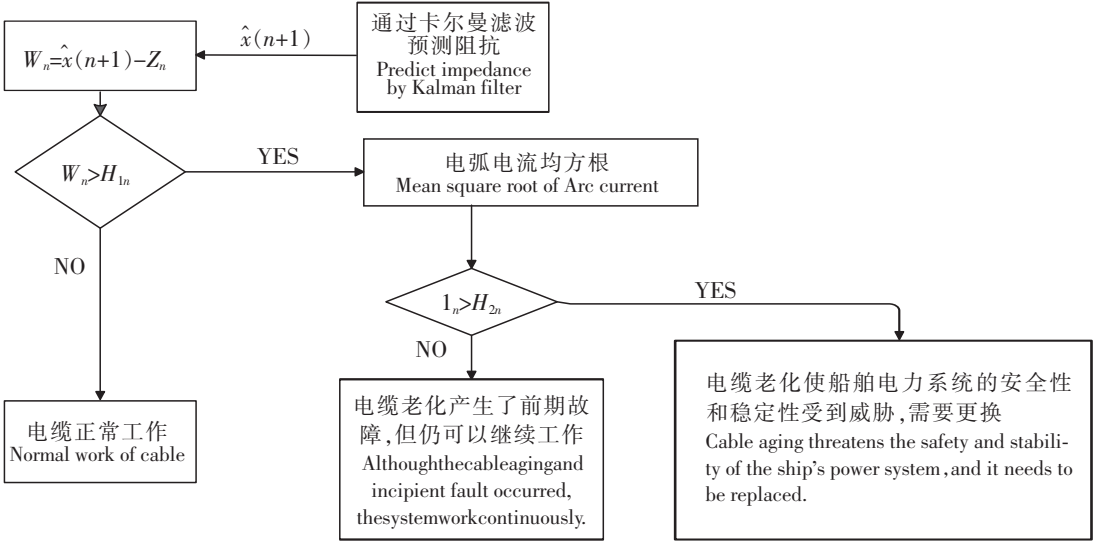


图 4 船舶电缆老化预测方法流程图

Fig.4 The flowchart of prediction method of ship cable aging

2.2 卡尔曼滤波算法的推导

2.2.1 船舶电缆阻抗动态模型

船舶电缆阻抗离散时间的动态系统由描述状态向量的状态方程和描述观测向量的观测方程共同表示。

1) 状态方程

$$\mathbf{x}(n+1) = \mathbf{F}(n+1, n)\mathbf{x}(n) + \mathbf{G}(n+1, n)\mathbf{U}(n) + \mathbf{v}_1(n)。 \quad (1)$$

式中: M 维向量 $\mathbf{x}(n)$ 表示船舶电缆阻抗在离散时间 n 的状态向量; $M \times M$ 矩阵 $\mathbf{F}(n+1, n)$ 描述船舶电缆阻抗在时间 n 的状态到 $n+1$ 的状态之间的转移过程; M 维向量 $\mathbf{G}(n+1, n)$ 描述船舶电缆阻抗在时间 n 的状态到 $n+1$ 的状态之间受其他因素的影响; $\mathbf{U}(n)$ 代表新息; M 维向量 $\mathbf{v}_1(n)$ 描述研究船舶电缆阻抗过程中因简化或忽略一些因素而产生的误差, 假设 $\mathbf{v}_1(n)$ 是均值为零的白噪声序列, 因此它的最优估计为零。

图1所描述的船舶电缆模型中, 电容 C_1 在老化过程中会随着时间逐渐变化, 用 $C_{1(n-1)}$ 和 C_{1n} 表示 C_1 变化过程中 $n-1$ 和 n 两个时刻的状态, $n-1$ 时刻电缆模型的阻抗值可由式(2)表示。

$$Z_{n-1} = (R + j\omega L_2 + Z_x)(-j(1/(\omega C_{1(n-1)})))/(R + j\omega L_2 + Z_x - j(1/(\omega C_{1(n-1)})))。 \quad (2)$$

在 Z_n 的表达式中, 令 $C_{1n} = C_{1(n-1)} + \Delta C$, 则

$$Z_n = (R + j\omega L_2 + Z_x)(-j(1/(\omega(C_{1(n-1)} + \Delta C))))/(R + j\omega L_2 + Z_x - j(1/(\omega(C_{1(n-1)} + \Delta C))))。 \quad (3)$$

把式(2)化简为

$$Z_n = Z_{n-1} + \omega \Delta C j。 \quad (4)$$

构建船舶电缆阻抗的状态方程, 需要把式(4)转换为如式(1)一样的向量形式, 动态方程(4)可以改写为

$$\mathbf{x}_n = \mathbf{F}\mathbf{x}_{n-1} + \mathbf{G}\mathbf{U}。 \quad (5)$$

其中: $\mathbf{F} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$; $\mathbf{G} = [1 \quad w]^T$; $\mathbf{U} = \Delta C$; $\mathbf{x}_n = [C_{1n} \quad Z_n]^T$ 。

2) 观测方程

$$\mathbf{y}(n) = \mathbf{H}(n)\mathbf{x}(n) + \mathbf{v}_2(n)。 \quad (6)$$

式中: N 维向量 $\mathbf{y}(n)$ 描述船舶电缆阻抗在时间 n 的观测向量; $N \times M$ 矩阵 $\mathbf{H}(n)$ 描述船舶电缆阻抗在离散时间 n 的状态向量和观测向量之间的关系; N 维向量 $\mathbf{v}_2(n)$ 描述船舶电缆阻抗在测量过程中存在的误差, 假设 $\mathbf{v}_2(n)$ 是均值为零的白噪声序列, 因此它的最优估计为零。

对于解决这个问题的优化算法, 主要有 H_∞ 滤波算法和卡尔曼滤波算法^[13-15], 而可以证明卡尔曼滤波算法比 H_∞ 滤波算法在跟踪不平稳系统时具有更优的性能, 所以本文利用卡尔曼滤波算法的思想来预测 Z_n 。

鉴于本文的研究重点, 对它们之间性能的比较本文不再赘述。

2.2.2 船舶电缆阻抗预测

船舶电缆阻抗在 n 时刻状态向量 $\mathbf{x}(n)$ 的估计值为 $\hat{\mathbf{x}}(n)$, $n+1$ 时刻状态向量 $\mathbf{x}(n+1)$ 的预测估计值 $\hat{\mathbf{x}}^-(n+1)$, 经过卡尔曼滤波算法更新后得到的 $n+1$ 时刻状态向量 $\mathbf{x}(n+1)$ 估计值为 $\hat{\mathbf{x}}(n+1)$ 。由系统状态方程(1)可得:

$$\hat{\mathbf{x}}^-(n+1) = \mathbf{F}(n+1, n)\hat{\mathbf{x}}(n) + \mathbf{G}(n+1, n)\mathbf{U}(n)。$$

由观测方程(6)可知, 在 $n+1$ 时刻电缆阻抗观测值 $y(n+1)$ 的估计值为:

$$\hat{\mathbf{y}}(n+1) = \mathbf{H}(n+1)\hat{\mathbf{x}}(n+1)。$$

利用 $y(n+1)$ 和 $\hat{\mathbf{y}}(n+1)$ 的残差来修正 $n+1$ 时刻状态向量 $\mathbf{x}(n+1)$ 的估计预测值 $\hat{\mathbf{x}}^-(n+1)$, 得到 $n+1$ 时刻状态向量 $\mathbf{x}(n+1)$ 的预测值 $\hat{\mathbf{x}}(n+1)$ 。 $y(n+1)$ 和 $\hat{\mathbf{y}}(n+1)$ 的残差: $\alpha(n+1) =$

$y(n+1) - \hat{y}(n+1)$ ，称为新息。

卡尔曼系数用来权衡阻抗预测模型和阻抗观测模型的比重，用其构建船舶电缆阻抗的预测公式，更新公式如下：

$$\hat{\mathbf{x}}(n+1) = \hat{\mathbf{x}}^-(n+1) + K_i(n+1)\alpha(n+1)。(7)$$

式中： $K_i(n+1)$ 为卡尔曼系数，由新息过程的正交性原理可知， n 时刻的新息 $\alpha(n)$ 与所有过去的观测数据 $y(1), \dots, y(n-1)$ 正交，即 $E\{\alpha(n)y^H(k)\} = 0, 1 \leq k \leq (n-1)$ ，可得卡尔曼系数 $K_i(n+1)$ 的表达式为：

$$K_i(n+1) = \mathbf{P}_i^-(n+1)\mathbf{H}^T(n+1)[\mathbf{H}(n+1)\mathbf{P}_i^-(n+1)\mathbf{H}^T(n+1) + R(n+1)]^{-1}。(8)$$

式 (8) 中： $\mathbf{P}_i^-(n+1)$ 为状态协方差矩阵传递的状态方程； \mathbf{H} 是观测矩阵； R 是观测噪声方差。

$$\mathbf{P}_i^-(n+1) = \mathbf{F}\mathbf{P}_i(n)\mathbf{F}^T + \mathbf{Q}。$$

其中： $\mathbf{P}_i(n)$ 是状态协方差矩阵； \mathbf{F} 是状态转移矩阵； \mathbf{Q} 是状态转移协方差矩阵。

每一轮迭代后状态协方差矩阵需要不断更新，以便下一轮迭代时使用，状态协方差矩阵的更新方程为：

$$\mathbf{P}_i(n+1) = [\mathbf{I} - K_i(n+1)]\mathbf{P}_i^-(n+1)。$$

2.2.3 卡尔曼滤波算法总结

船舶电缆阻抗的动态方程为：

$$\begin{cases} \mathbf{x}(n+1) = \mathbf{F}(n+1, n)\mathbf{x}(n) + \mathbf{G}(n+1, n)\mathbf{U}(n) + \mathbf{v}_1(n), \\ \mathbf{y}(n) = \mathbf{H}(n)\mathbf{x}(n) + \mathbf{v}_2(n). \end{cases} (9)$$

应用卡尔曼滤波算法对船舶电缆阻抗进行预测：

1) 电缆阻抗和状态协方差矩阵的预测：

$$\hat{\mathbf{x}}^-(n+1) = \mathbf{F}(n+1, n)\hat{\mathbf{x}}(n) + \mathbf{G}(n+1, n)\mathbf{U}(n), (10)$$

$$\mathbf{P}_i^-(n+1) = \mathbf{F}\mathbf{P}_i(n)\mathbf{F}^T + \mathbf{Q}。(11)$$

2) 卡尔曼系数的计算：

$$\begin{aligned} K_i(n+1) &= \mathbf{P}_i^-(n+1)\mathbf{H}^T(n+1)[\mathbf{H}(n+1)\mathbf{P}_i^-(n+1) \\ &\quad \mathbf{H}^T(n+1) + R(n+1)]^{-1}。 \end{aligned} (12)$$

3) 电缆阻抗和状态协方差矩阵的状态更新：

$$\hat{\mathbf{x}}(n+1) = \hat{\mathbf{x}}^-(n+1) + K_i(n+1)\alpha(n+1), (13)$$

$$\mathbf{P}_i(n+1) = [\mathbf{I} - K_i(n+1)]\mathbf{P}_i^-(n+1)。(14)$$

为了便于分析，基于卡尔曼滤波算法的电缆阻抗预测流程如图 5 所示。

3 船舶电缆老化预测方法仿真实验

仿真实验对上述推导的船舶电缆老化预测方法进行模拟，仿真参数如下：

状态矩阵的初值 $\mathbf{X}_n = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix}$ ；

状态协方差矩阵的初值 $\mathbf{P}_i(n) = \begin{bmatrix} 0.0001 & 0 \\ 0 & 0.0001 \end{bmatrix}$ ；

状态转移协方差矩阵 $\mathbf{Q} = \begin{bmatrix} 0.001 & 0 \\ 0 & 0.001 \end{bmatrix}$ ；

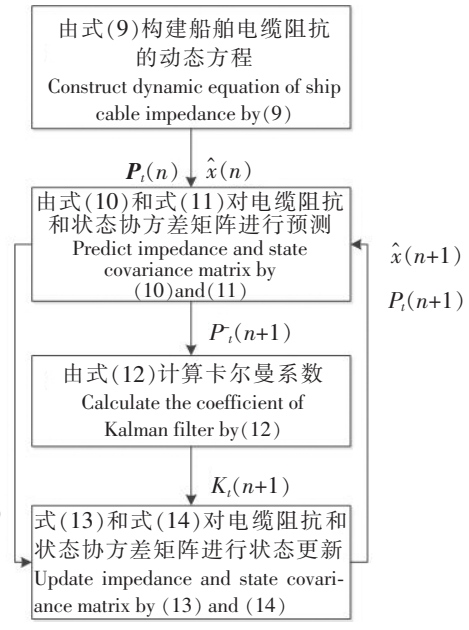


图 5 卡尔曼滤波算法流程图
Fig.5 The flowchart of kalman filter

观察矩阵 $\boldsymbol{H}(n) = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$;

观测噪声方差 $\boldsymbol{R} = \begin{bmatrix} 0.0001 & 0 \\ 0 & 0.0001 \end{bmatrix}$;

控制矩阵 $\boldsymbol{G} = \begin{bmatrix} 1 \\ 377 \end{bmatrix}$ 。

图6 为通过卡尔曼滤波算法预测到阻抗值的估计值; 图7 为阻抗的残差信号 W_n ; 图8 为阻抗的残差信号 W_n 与电弧电流 I_n 的比较。

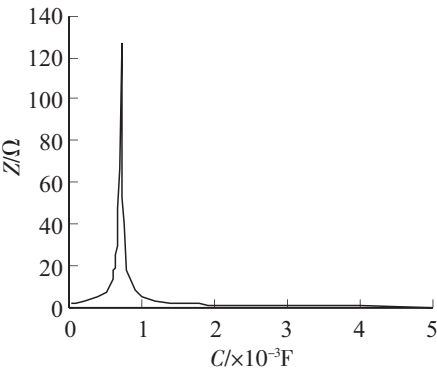


图6 阻抗值 Z_n 的估计值

Fig.6 The estimated value of impedance Z_n

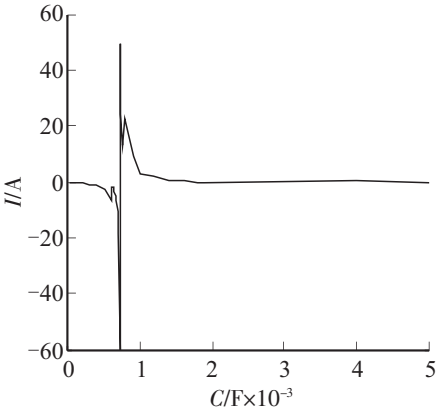


图7 阻抗残差信号 W_n

Fig.7 The impedance residual signal W_n

图7 中 W_n 开始增大时, 表明预测到的下一个状态的阻抗值与当前状态的阻抗值存在很大差异, 即 Z_n 开始发生突变; 很显然, 在临界处 $W_n > H_{1n}$, 由此可知电缆已进入非正常工作状态。另外, 由于电弧的产生使船舶电缆与船舶机舱及机舱的其他电气设备通过电弧构成回路产生电弧电流, 即短路电流, 导致电力系统局部短路。图8 中 W_n 开始增大之后, 电弧电流有效值 I_n 也迅速增大, 并且之后保持很大, 表明电力系统局部短路的短路电流也会迅速增大, 并且之后保持很大。当电弧电流有效值大于临界状态时, 电力系统局部短路的短路电流会威胁船舶电力系统的安全性和稳定性, 此时需要及时更换电缆。

仿真结果表明该方法可以对船舶电缆老化状况进行预测。

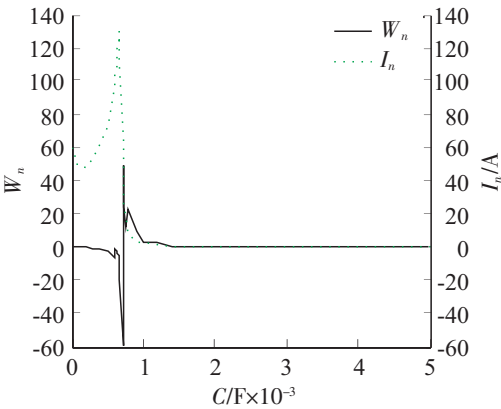


图8 阻抗残差信号 W_n 与电弧电流有效值 I_n 的比较曲线

Fig.8 The comparison curve between impedance residual signal W_n and effective value of arc current I_n

4 结论

针对船舶电缆老化预测, 本文首先建立船舶电缆的老化过程的模型, 得出阻抗和电弧电流的变化规律, 然后利用卡尔曼滤波算法对电缆老化过程中的阻抗值进行估计, 进而得到实际值和估计值之间的残差, 通过预测的阻抗值和当前阻抗值的残差来检测电缆工作状态, 利用电弧电流的突变特性预测船舶电缆老化产生前期故障的临界状态。最后, 通过仿真实验验证了该方法是可行的。

[参 考 文 献]

- [1] 魏一. 船用低压电缆剩余寿命预测理论与实验研究 [D]. 大连: 大连海事大学, 2012.
- [2] 高云鹏, 谭甜源, 刘开培, 等. 电缆接头温度反演及故障诊断研究 [J]. 高电压技术, 2016, 42(2): 535-542.
- [3] 杨春宇. 电力电缆故障分析与诊断技术的研究 [D]. 大连: 大连理工大学, 2013.
- [4] 牛睿. 输电线路故障定位研究及其分析平台开发 [D]. 济南: 山东大学, 2015.
- [5] 刘亚东. 输电线路分布式故障测距理论与关键技术研究 [D]. 上海: 上海交通大学, 2012.
- [6] 彭浩, 沈兴来, 陈奎. 电缆单端故障测距的阻抗-行波组合法 [J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(23): 110-114.
- [7] 伏圣群. 行波反射法电缆故障检测关键技术研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2014.
- [8] 张建国, 徐航, 马荔, 等. 面向电缆故障检测的布尔混沌时域反射法 [J]. 工矿自动化, 2016, 42(1): 35-39.
- [9] 吕志立. 船舶电力系统故障演化机理与预测方法研究 [D]. 厦门: 集美大学, 2017.
- [10] 姚海燕, 张静, 留毅, 等. 基于多尺度小波判据和时频特征关联的电缆早期故障检测和识别方法 [J]. 电力系统保护与控制, 2015(9): 115-123.
- [11] 许奇歆, 王荣杰, 周海峰. 电力系统故障预测方法研究 [J]. 电工摘要, 2016, 12(6): 6-11.
- [12] GHANBARI T. Kalman filter based incipient fault detection method for underground cables [J]. IET Generation Transmission & Distribution, 2015, 9(14): 1988-1997.
- [13] LV Q, ZHANG X D YING J. Kalman filtering algorithm for blind source separation [C]. Philadelphia: ICASSP 2005, 2005.
- [14] ZHU X L, ZHANG X D, YING J. A new kalman filtering algorithm for nonlinear principal component analysis [J]. Springer Berlin Heideibers, 2005, 3496: 1010-1015.
- [15] NIVA D, AUROBINDA R, PRADIPTA K D. A robust H infinite learning approach to blind separation slowly time-varying mixture of acoustic electronmechanical signals [J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2009, 23(6): 2049-2058.

(责任编辑 陈 敏 英文审校 郑青榕)